

فصل هفتم

اتصال کوتاه متقارن

۱-۷ مقدمه

برای وقوع اتصال کوتاه^(۱) در یک سیستم قدرت، جریان اتصال کوتاه توسط ولتاژ داخلی ژنراتور، امپدانس ژنراتور و امپدانس بین محل وقوع اتصال کوتاه تا ترمینالهای ژنراتور بدست می‌آید. جریانی که بلافاصله پس از وقوع اتصال کوتاه در ماشین سنکرون بوجود می‌آید با جریان عبوری پس از چند سیکل و یا جریان حالت ماندگار اتصال کوتاه کاملاً متفاوت است و علت آن تأثیر عکس‌العمل آرمیچر در ماشین است که در لحظه وقوع اتصال کوتاه وجود ندارد و بتدریج در ماشین پدید می‌آید. در این فصل روش‌های محاسبه جریان‌های اتصال کوتاه در مقاطع زمانی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل ۴، مطالعه پخش بار، حالت ماندگار سیستم را بررسی کردیم. در فصل ۵ نیز تغییرات و اختلالات جزئی سیستم را مورد مطالعه قرار دادیم. بررسی اختلالات بزرگ و ناگهانی، تحت عنوان خطاها^(۲)، در سیستم‌های قدرت اهمیت ویژه‌ای دارد که در این فصل و فصول بعدی به آن می‌پردازیم. انواع اتصال کوتاه‌ها و باز شدن (یا پاره شدن) خطوط انتقال از مهمترین خطاها در سیستم‌های قدرت محسوب می‌شوند. علل پیدا شدن خطاها عبارتند از:

- ۱- صاعقه
- ۲- سالم نبودن تجهیزات و لوازم سیستم
- ۳- شرایط جوی مانند باران، باد، یخ‌بندان شدید و ...
- ۴- برخورد وسائل نقلیه زمینی با دکلها، و برخورد وسائل نقلیه هوایی با هادیهای خطوط انتقال
- ۵- سقوط درختان بر روی هادیهای خط انتقال
- ۶- برخورد پرندگان با هادیهای خطوط انتقال و یا ورود حیوانات به پست‌ها و کلیدخانه‌ها

۷- عوامل تصادفی و اتفاقات غیر قابل پیش‌بینی

خطاهائی که بر اثر عوامل فوق‌الذکر در سیستم‌های قدرت پدید می‌آیند، به ترتیب میزان شدت بصورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

الف) اتصال کوتاه متقارن (سه فاز) ^(۱). این اتصال کوتاه بر اثر اتصال و یا برخورد سه فاز به یکدیگر بوجود می‌آید. ممکن است سه فاز همزمان به زمین هم متصل گردند. در هر صورت در اتصال کوتاه متقارن، سیستم حالت تقارن خود را از دست نداده و متقارن می‌باشد.

ب) اتصال کوتاه دو فاز. در اینصورت باید دو حالت را مورد بررسی قرار داد. در حالت اول دو فاز فقط به یکدیگر وصل می‌شوند (اتصال کوتاه دو فاز بیکدیگر) ^(۲)، و در حالت دوم دو فاز همزمان به زمین متصل می‌گردند (اتصال کوتاه دو فاز به زمین) ^(۳).

ج) اتصال کوتاه یک فاز به زمین ^(۴).

د) از هم‌گسیختگی و یا پاره شدن هادیهای خط انتقال ^(۵).

اغلب اتصال کوتاه‌ها در سیستم‌های قدرت (بیش از ۷۵٪) از نوع اتصال کوتاه یک فاز به زمین می‌باشند که معمولاً بر اثر شکست الکتریکی و ایجاد جرقه روی مقره‌ها پدید می‌آیند. احتمال وقوع اتصال کوتاه دو فاز نیز بیشتر از اتصال کوتاه متقارن می‌باشد. گرچه احتمال وقوع اتصال کوتاه متقارن بسیار کم (حدود ۵٪) می‌باشد، لیکن از آنجائیکه بدترین وضعیت را برای سیستم بوجود می‌آورد، بسیاری از محاسبات کلاسیک نظیر انتخاب کلیدهای قدرت، بررسی پایداری گذرا و ... بر مبنای جریانهای اتصال کوتاه متقارن بنا شده‌اند.

ظرفیت انتقال قدرت یک خط انتقال بر اثر اتصال کوتاه متقارن به صفر می‌رسد، در حالیکه در اتصال کوتاه‌های نامتقارن ^(۶) (ب و ج فوق‌الذکر) قسمتی از قدرت قبلی خط منتقل می‌گردد. علاوه بر کاهش ظرفیت انتقال قدرت، جریانهای زیاد اتصال کوتاه می‌توانند به وسایل و تجهیزات سیستم آسیب بزنند، و لذا محل‌های اتصال کوتاه شده در اسرع وقت باید از سیستم قدرت جدا شوند. بنابراین مطالعه سیستم قدرت در شرایط اتصال کوتاه برای حفاظت سیستم و تعیین مقادیر نامی کلیدهای قدرت و رله‌ها کاملاً ضروری می‌باشد.

1- symmetrical (Three Phase) Short Circuit

2- Line - to - Line

3- Double Line -to - Ground

4- Single Line - to - Ground

5- Open Conductor Fault

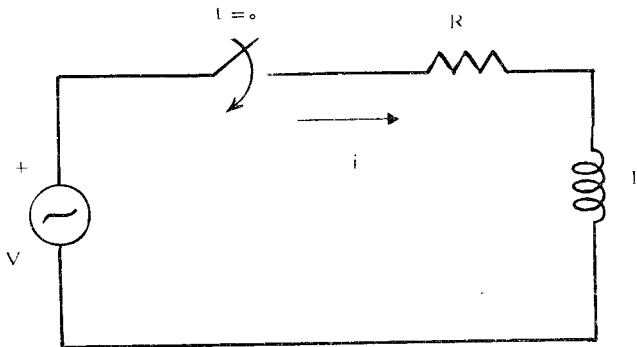
6- Unsymmetrical Short Circuit

بسیاری از اتصال کوتاه‌ها موقتی بوده و خودبخود برطرف می‌شوند. بهمین منظور در عمل در بعضی نقاط سیستم از کلیدهای وصل مجدد^(۱) استفاده می‌شود. این کلیدها پس از وقوع اتصال کوتاه یک یا دو بار وصل می‌شوند تا از برطرف شدن اتصال کوتاه مطمئن شوند. اگر پس از یک یا دو بار وصل مجدد، هنوز اتصال کوتاه برقرار باشد، کلید بطور دائمی باز خواهد ماند.

از آنجائیکه جریان‌های کاپاسیتیو خطوط انتقال و جریان بارها در مقایسه با جریان‌های اتصال کوتاه بسیار کم می‌باشند، از کاپاسیتانس خطوط و اثر بارها در اغلب محاسبات اتصال کوتاه صرفنظر خواهد شد.

۲-۷ بررسی مدار سری RL در حالت گذرا

هنگامی که در ترمینالهای خروجی یک ژنراتور سنکرون بی‌بار اتصال کوتاه متقارن اتفاق می‌افتد، مدار معادل یک‌فاز آن قابل مقایسه با مدار سری RL است که ولتاژ سینوسی $V = V_{\max} \sin(\omega t + \alpha)$ به آن اعمال می‌شود که در آن α در لحظه اعمال ولتاژ صفر است. بنابراین α مقدار دامنه ولتاژ را هنگام بسته شدن کلید مشخص می‌کند. شکل (۷-۱) مدار RL مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۱: مدار سری RL

معادله دیفرانسیل این مدار عبارتست از:

$$V_{\max} \sin(\omega t + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt}$$

با این حل معادله، جریان i را بدست می‌آوریم:

$$i = \frac{V_{\max}}{|Z|} [\sin(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-\frac{R}{L}t} \sin(\alpha - \theta)] \quad (v-1)$$

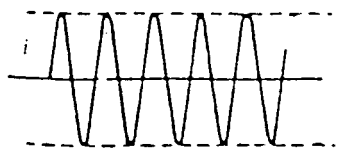
که در آن:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

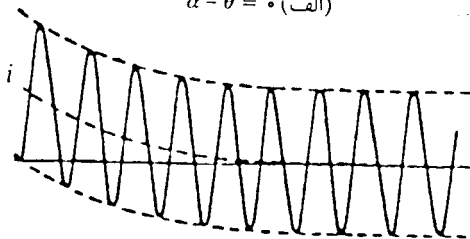
$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

جمله اول معادله (v-1) که نسبت به زمان بطور سینوسی تغییر می‌نماید، پاسخ ماندگار بوده، و جمله دوم که به مؤلفه DC معروف است پاسخ گذرای مدار است و نسبت به زمان بصورت نمائی و با ثابت زمانی $\frac{L}{R}$ تغییر می‌نماید. دامنه مؤلفه DC به مقدار لحظه‌ای ولتاژ هنگام بسته شدن کلید و همچنین به ضریب قدرت مدار RL بستگی دارد. این مؤلفه در $\alpha - \theta = 0$ حداقل می‌باشد و مقدار آن به صفر می‌رسد و به ازاء $\alpha - \theta = -\frac{\pi}{4}$ مقدار اولیه آن با دامنه موج سینوسی یعنی $\frac{V_{\max}}{|Z|}$ مساوی است.

در شکل (v-2) منحنی تغییرات جریان مدار RL در این دو حالت نشان داده شده‌است.



(الف) $\alpha - \theta = 0$



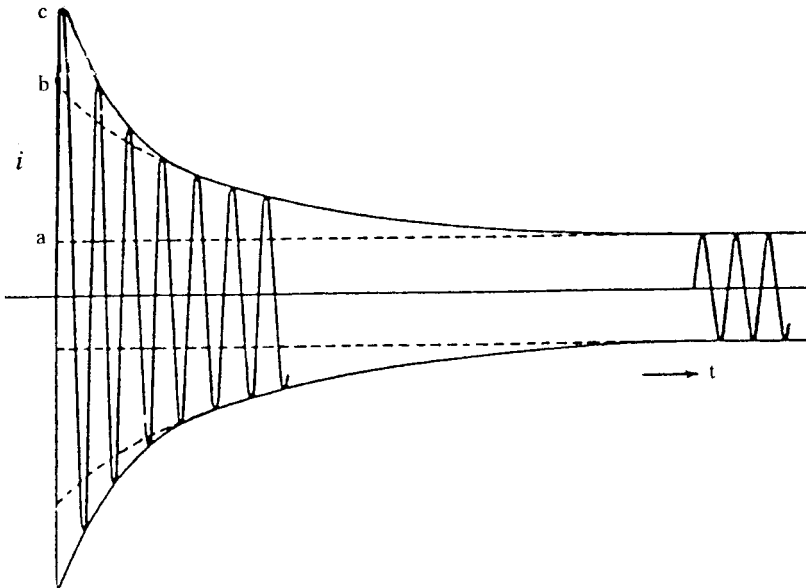
(ب) $\alpha - \theta = -\frac{\pi}{4}$

شکل v-2: منحنی تغییرات جریان در مدار سری RL

۷-۳ اتصال کوتاه در ماشین سنکرون بی بار

در فصل دوم اساس کار ماشین سنکرون و مدار معادل آنرا بررسی کردیم. هنگامی که یک ژنراتور سنکرون اتصال کوتاه می شود، ظاهراً جریان اتصال کوتاه مشابه جریان یک مدار سری RL است که به آن ولتاژ سینوسی اعمال می گردد. لیکن اختلاف اساسی بین این دو حالت وجود دارد، زیرا جریان عبوری از آرمیچر روی میدان دوار ماشین تأثیر می گذارد.

اگر در ترمینالهای خروجی یک ژنراتور سنکرون بی بار اتصال کوتاه متقارن بوقوع پیوندد، با قراردادن یک اسیلوگرام جریان در یکی از فازهای ژنراتور می توان تغییرات جریان اتصال کوتاه را نسبت به زمان رسم و مورد بررسی قرار داد. شکل (۷-۳) این تغییرات را در حالتی که مؤلفه DC حذف شده است نشان می دهد. مقایسه شکل های (۷-۲) الف و (۷-۳) اختلاف تأثیر یک ولتاژ سینوسی به مدار سری RL را با ژنراتور سنکرون اتصال کوتاه شده نشان می دهد. در هر دو شکل مؤلفه DC صفر می باشد.

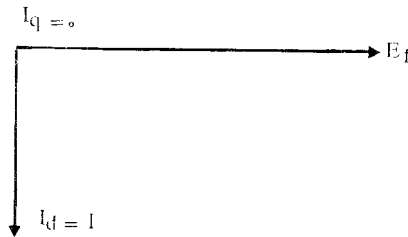


شکل ۷-۳: تغییرات جریان اتصال کوتاه متقارن در ژنراتور سنکرون بی بار

شکل (۷-۳) نشان می دهد که جریان اتصال کوتاه در چند سیکل اولیه (دو الی سه سیکل) خیلی بیشتر از سیکل های بعدی است و علت آن این است که شار مغناطیسی در فاصله هوایی ماشین در لحظه وقوع اتصال کوتاه بسیار زیاد است و پس از عبور جریان اتصال کوتاه از

آرمیچر، شار مذکور کاهش می‌یابد. در مدار معادل ماشین سنکرون، تأثیر جریان آرمیچر بر شار مغناطیسی فاصله هوائی (عکس العمل آرمیچر) را بررسی کردیم. راکتانس سنکرون در مدار معادل مذکور، تأثیر عکس‌العمل آرمیچر را منظور نموده‌است و لذا مدار معادل بدست آمده برای محاسبات حالت ماندگار سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

هنگامی که در یک ماشین سنکرون اتصال کوتاه اتفاق می‌افتد، مدت زمانی طول می‌کشد تا شار مغناطیسی فاصله هوا کم شود و عکس‌العمل آرمیچر بوجود آید. با کاهش شار فاصله هوا جریان آرمیچر کاهش می‌یابد، زیرا ولتاژ تولید شده توسط شار مذکور تعیین‌کننده جریان آرمیچر از مسیر مقاومت اهمی و راکتانس سیم‌پیچ آرمیچر می‌باشد. از آنجائیکه مقاومت اهمی آرمیچر در مقایسه با راکتانس القائی ماشین قابل صرف‌نظر است، جریان اتصال کوتاه مطابق شکل (۷-۴) تقریباً 90° درجه از ولتاژ بی‌باری E_f عقب‌تر می‌باشد.



شکل ۷-۴: جریان‌های محور مستقیم و عمودی در حالت اتصال کوتاه

با توجه به شکل (۷-۴) جریان محور مستقیم با جریان اتصال کوتاه برابر بوده و جریان محور عمودی صفر است. معادله زیر ولتاژ بی‌باری ژنراتور E_f را برحسب این جریان‌ها نشان می‌دهد:

$$E_f = V + I_a R_a + j I_d X_d + j I_q X_q$$

در شرایط اتصال کوتاه با قراردادن $I_d = I$ و $I_q = 0$ ، $R_a = 0$ و $V = 0$ در رابطه اخیر داریم:

$$E_f = j I X_d \quad (7-2)$$

و این رابطه نشان می‌دهد که در محاسبات اتصال کوتاه سیستم‌های قدرت، باید از راکتانس محور مستقیم (X_d) استفاده نمود.

در شکل (۷-۳) مقدار ماکزیمم "جریان ماندگار اتصال کوتاه" ^(۱) می باشد راکتانس سنکرون و یا "راکتانس محور مستقیم" ^(۲) با توجه به رابطه (۷-۲) از معادله زیر تعریف می شود:

$$|I| = \frac{oa}{\sqrt{2}} = \frac{|E_f|}{X_d} \quad (7-3)$$

که در آن $|I|$ مقدار مؤثر جریان ماندگار اتصال کوتاه و X_d راکتانس محور مستقیم ماشین می باشند.

اگر از چند سیکل اول که در آن دامنه جریان شدت کاهش می یابد صرف نظر کنیم، طول ob نشان دهنده مقدار ماکزیمم "جریان گذرای اتصال کوتاه" ^(۳) می باشد. در این صورت اگر E_f را ثابت فرض کنیم، باید راکتانس جدیدی را برای ماشین تعریف کنیم که به "راکتانس گذرای محور مستقیم" ^(۴) موسوم است و از رابطه زیر تعریف می شود:

$$|I'| = \frac{ob}{\sqrt{2}} = \frac{|E_f|}{X'_d} \quad (7-4)$$

در این معادله $|I'|$ مقدار مؤثر جریان گذرای اتصال کوتاه می باشد.

جریانی که بلافاصله پس از وقوع اتصال کوتاه از آرمیچر عبور می کند به "جریان زیر گذرای اتصال کوتاه" ^(۵) I'' معروف است. راکتانس مربوط به این جریان که به "راکتانس زیرگذرای محور مستقیم" ^(۶) موسوم است از رابطه زیر تعریف می شود:

$$|I''| = \frac{oc}{\sqrt{2}} = \frac{|E_f|}{X''_d} \quad (7-5)$$

شکل های (۷-۵) و (۷-۶) تغییرات مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه و راکتانس محور مستقیم ماشین و تقریب های پله ای این کمیت ها را بر حسب زمان نشان می دهند. زمان زیرگذرا t_{st} حدود ۲ سیکل (۰/۰۴ ثانیه) بوده و زمان گذرا t_{tr} حدود ۲۵ سیکل (۰/۵ ثانیه) می باشد.

1- Steady State Short Circuit Current

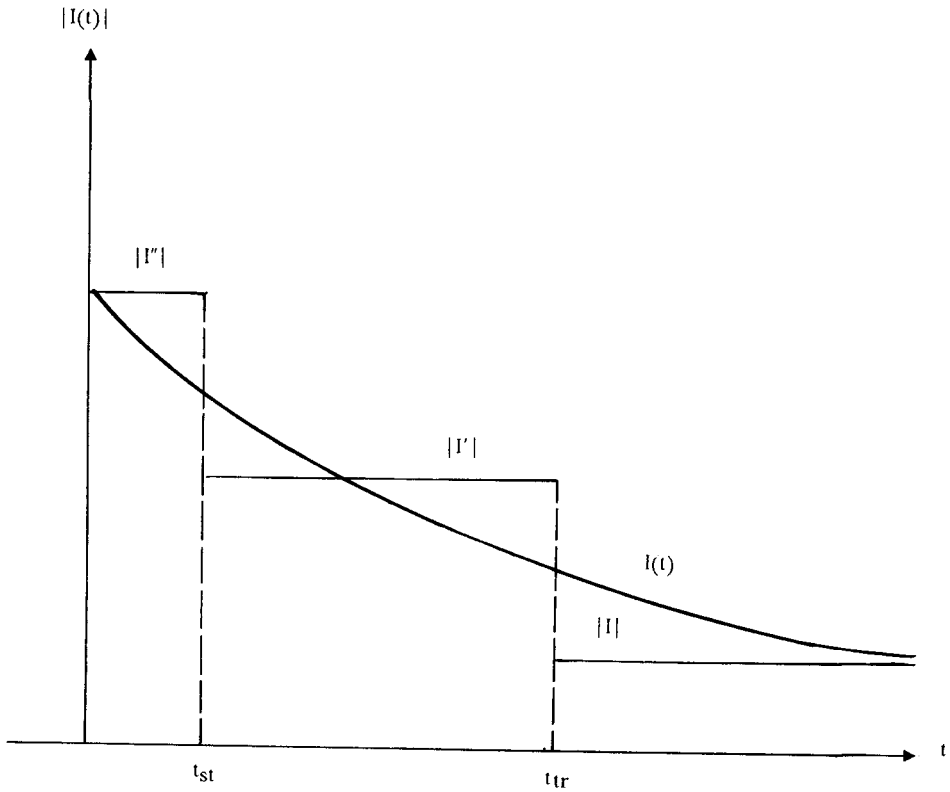
2- Direct-Axis Reactance

3- Transient Short-Circuit Current

4- Direct-Axis Transient Reactance

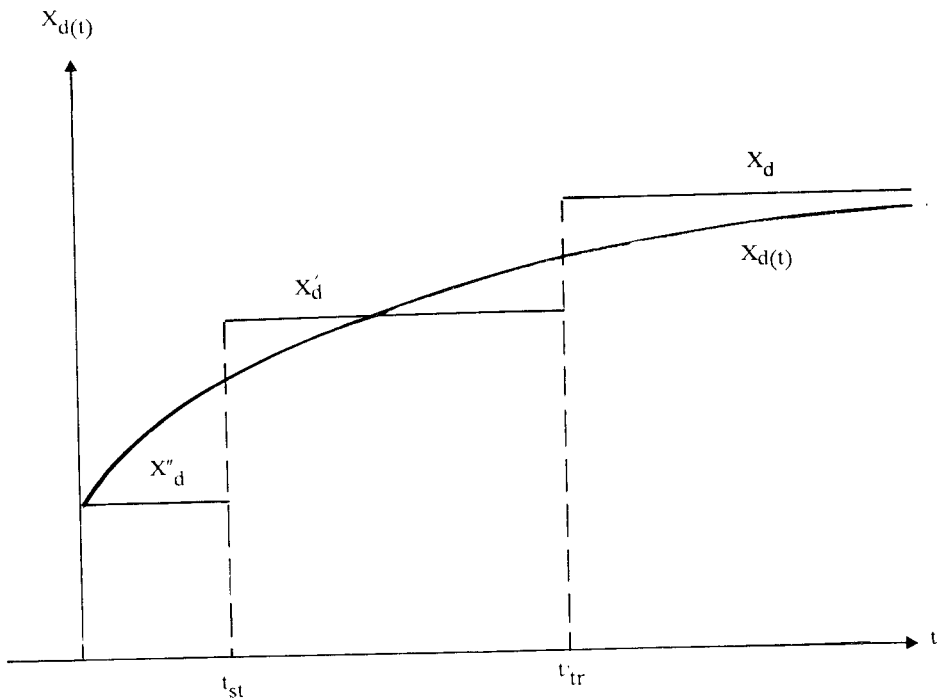
5- Subtransient Short-Circuit Current

6- Direct-Axis Subtransient Reactance



شکل ۵-۷: تغییرات مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه و تقریب‌های پله‌ای آن

جریان زیرگذرای اتصال کوتاه $|I''|$ خیلی بیشتر از جریان ماندگار اتصال کوتاه $|I'|$ می‌باشد. بنابراین ولتاژ بی‌باری ماشین بلافاصله پس از وقوع اتصال کوتاه بیشتر از ولتاژ بی‌باری حالت ماندگار است، لیکن برای محاسبه جریان‌های اتصال کوتاه، ولتاژ بی‌باری $|E_f|$ را ثابت فرض نموده و راکتانس‌های مختلفی را در سه حالت ماندگار، گذرا و زیرگذرا در نظر می‌گیریم. جدول (۷-۱) مقادیر عمومی^(۱) راکتانس‌ها را در ماشین‌های سنکرون برحسب PU نشان می‌دهد. راکتانس‌های توالی منفی (X_-) و توالی صفر (X_0) که در جدول نشان داده شده‌اند در فصل هفتم معرفی خواهند شد.



شکل ۶-۷: تغییرات راکتانس محور مستقیم ماشین و تقریب‌های پله‌ای آن

جدول ۱-۷: مقادیر عمومی راکتانس‌ها در ماشین سنکرون بر حسب PU

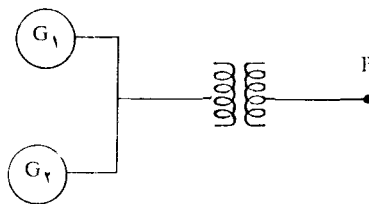
	X_d	X'_d	X''_d	X_-	X_0
توربوژنراتورهای دو قطب	۰/۹۵-۱/۴۵	۰/۱۲-۰/۲۱	۰/۰۷-۰/۱۴	۰/۰۷-۰/۱۴	۰/۰۱-۰/۰۸
توربوژنراتورهای چهار قطب	۱/۰۰-۱/۴۵	۰/۲-۰/۲۸	۰/۱۲-۰/۱۷	۰/۱۲-۰/۱۷	۰/۰۱۵-۰/۱۴
ژنراتورهای با قطب برجسته	۰/۶-۱/۵	۰/۲-۰/۵	۰/۱۳-۰/۳۲	۰/۱۳-۰/۳۲	۰/۰۳-۰/۲۳
کندانسورهای سنکرون	۱/۲۵-۲/۲۰	۰/۳-۰/۶	۰/۱۹-۰/۳۸	۰/۱۸-۰/۳۷	۰/۰۲۵-۰/۱۶

مثال ۷-۱: شکل (۷-۷) دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت را نشان می‌دهد. مشخصات سیستم بشرح زیر است:

ژنراتور G_1 : ۷۵ MVA ، ۲۰ KV ، $X''_d = 0.15$

ژنراتور G_2 : ۱۰۰ MVA ، ۲۰ KV ، $X''_d = 0.20$

ترانسفورماتور : ۱۵۰ MVA ، ۱۳۲/۲۰ KV ، $X_d = 0.15$



شکل ۷-۷: مربوط به مثال ۷-۱

هنگامی که در شرایط بی‌باری سیستم، ولتاژ طرف فشار قوی ترانسفورماتور ۱۲۸ کیلوولت بوده است، اتصال کوتاه متقارنی در نقطه P بوقوع می‌پیوندد. جریان زیرگذرای اتصال کوتاه در محل وقوع و در هر یک از ژنراتورها را بدست آورید.

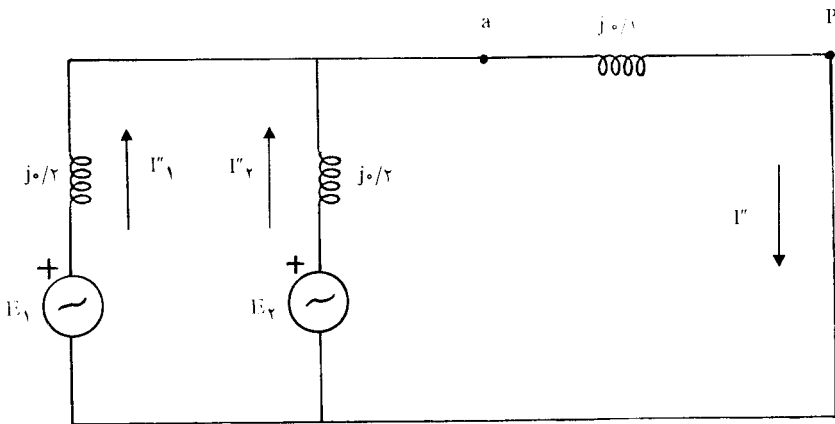
حل: قدرت مینا را ۱۰۰ مگاوات آمپر، و ولتاژهای مینا در طرف‌های فشار قوی و فشار ضعیف ترانسفورماتور را بترتیب ۱۳۲ کیلوولت و ۲۰ کیلوولت انتخاب می‌کنیم. راکتانس ژنراتور G_1 در مینای انتخاب شده برابر است با:

$$X''_d = 0.15 \left(\frac{100}{75} \right) = 0.2 \text{ PU}$$

راکتانس ترانسفورماتور نیز بهمین ترتیب محاسبه شود:

$$X = 0.15 \left(\frac{100}{150} \right) = 0.1 \text{ PU}$$

مدار معادل سیستم قدرت با توجه به مقادیر راکتانس‌ها در شکل (۷-۸) رسم شده است. اتصال کوتاه در نقطه P با اتصال آن به نقطه صفر سیستم نشان داده شده است.



شکل ۷-۸: دیاگرام امپدانس سیستم قدرت شکل (۷-۷) در حالت اتصال کوتاه

در شرایط بی‌باری قبل از وقوع اتصال کوتاه داریم:

$$E_1 = E_2 = V_p = \frac{128}{132} = 0.97 \text{ PU}$$

ولتاژ محل اتصال کوتاه قبل از وقوع را با V_f نشان می‌دهیم و معمولاً زاویه آنرا صفر در نظر می‌گیریم (بردار مرجع). بنابراین:

$$V_f = 0.97 \angle 0^\circ \text{ PU}$$

حال جریان زیرگذرای اتصال کوتاه را محاسبه می‌کنیم:

$$I'' = \frac{0.97 \angle 0^\circ}{j0.1 + \frac{j0.2 \times j0.2}{j0.2 + j0.2}} = -j4/85 \text{ PU}$$

با محاسبه ولتاژ طرف فشار ضعیف ترانسفورماتور، جریان هریک از ژنراتورها را نیز بدست می‌آوریم:

$$V_a = j0.1 I'' = j0.1(-j4/85) = 0.485 \text{ PU}$$

$$I''_1 = I''_2 = \frac{0.97 - 0.485}{j0.2} = -j2/425 \text{ PU}$$

با محاسبه جریان مبنا، جریان‌های اتصال کوتاه برحسب آمپر را بدست می‌آوریم:

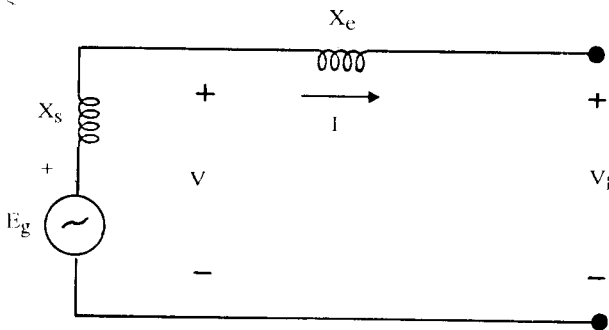
$$I_b = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 20} = 2886/75 \text{ A}$$

$$|I''_1| = |I''_2| = 2/425 \times I_b = 2/425 \times 2886/75 = 7000 \text{ PU}$$

$$|I''| = 4/85 I_b = 4/85 \times 2886/75 = 2121 \text{ A}$$

۷-۴ ولتاژهای داخلی ماشین سنکرون باردار در حالت گذرا

اگر هنگام وقوع اتصال کوتاه متقارن، ژنراتور سنکرون در شرایط بارداری باشد، محاسبه جریان اتصال کوتاه با آنچه در بخش (۷-۳) دیدیم متفاوت است. مدار معادل ژنراتور سنکرون در حالت بارداری در شکل (۷-۹) نشان داده شده‌است. در این مدار I و V بترتیب جریان بارداری و ولتاژ ترمینالهای ژنراتور هستند و X_e راکتانس معادل عناصری است که بین ژنراتور و محل وقوع اتصال کوتاه قرار دارند. نقطه P محل وقوع اتصال کوتاه بوده و V_f ولتاژ محل اتصال کوتاه قبل از وقوع می‌باشد.

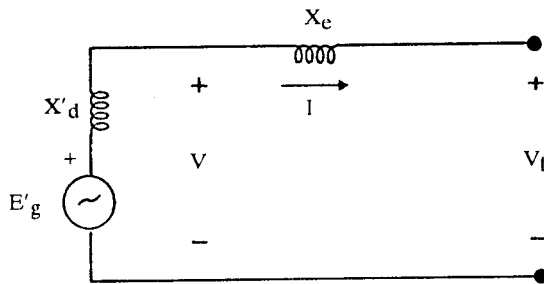


شکل ۷-۹: مدار معادل ژنراتور سنکرون در سیستم قدرت باردار

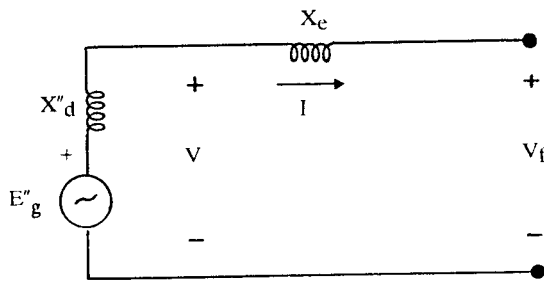
ولتاژ داخلی $E_g^{(1)}$ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_g = V + jIX_s \quad (7-6)$$

اگر اتصال کوتاه متقارنی در نقطه P اتفاق بیفتد، شکل (۷-۹) نمی تواند برای محاسبه جریان گذرا و جریان زیرگذرای اتصال کوتاه مورد استفاده قرارگیرد، بلکه از روی آن فقط می توان جریان ماندگار اتصال کوتاه را محاسبه نمود. برای محاسبه جریان گذرای اتصال کوتاه I' ، باید از راکتانس گذرای محور مستقیم X'_d در مدار معادل ژنراتور استفاده کرد. در اینصورت برای اینکه مدار معادل تونن از دیدگاه ترمینالهای ژنراتور تغییری نکند و جریان و ولتاژ ژنراتور در مقادیر I و V ثابت بمانند بجای ولتاژ داخلی E_g مقدار E'_g را جایگزین می کنیم و آنرا ولتاژ داخلی گذرا^(۱) می نامیم. شکل (۷-۱۰) مدل ژنراتور باردار را که برای محاسبه جریان گذرای اتصال کوتاه بکار می رود نشان می دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۷-۱۰: مدل ژنراتور سنکرون در سیستم قدرت باردار برای محاسبه جریان های گذرا و زیرگذرای اتصال کوتاه

برای محاسبه جریان زیرگذرای اتصال کوتاه I'' ، از مدار معادل نشان داده شده در شکل (۷-۱۰ب) استفاده می کنیم که در آن X''_d راکتانس زیرگذرای محور مستقیم و E''_g ولتاژ داخلی زیرگذرا^(۲) هستند.

ولتاژهای داخلی گذرا و زیرگذرا با توجه به شکل (۷-۱۰) از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$E'_g = V + jIX'_d \quad (7-7)$$

$$E''_g = V + jIX''_d \quad (7-8)$$

در حالت بی‌باری، $I = 0$ ، داریم:

$$E_g = E'_g = E''_g$$

لذا چنانچه از جریان‌های بار در مقایسه با جریان‌های اتصال کوتاه صرف‌نظر کنیم، برای محاسبه هر سه نوع جریان ماندگار، گذرا و زیرگذرای اتصال کوتاه می‌توانیم از E_g استفاده کنیم. موتورهای سنکرون دارای راکتانس مشابه ژنراتورها می‌باشند. چنانچه یک موتور سنکرون اتصال کوتاه شود، از شبکه انرژی الکتریکی دریافت نمی‌کند، لیکن میدان آن توسط جریان DC تحریک می‌شود و اینرسی رتور و بارهای متصله به آن موجب می‌شود تا محور موتور برای مدتی در حال گردش باقی بماند. در این مدت وجود ولتاژ داخلی موتور باعث عبور جریان از موتور به طرف سیستم خواهد شد و لذا موتور در این فاصله مانند یک ژنراتور سنکرون عمل می‌کند.

مدار معادل موتور سنکرون باردار برای محاسبه جریان‌های اتصال کوتاه کاملاً مشابه ژنراتور سنکرون باردار می‌باشد و با توجه به جهت جریان بار در موتورها، ولتاژهای داخلی گذرا و زیرگذرا از معادلات زیر بدست می‌آیند:

$$E'_m = V - jIX'_d \quad (7-9)$$

$$E''_m = V - jIX''_d \quad (7-10)$$

۷-۵ محاسبه اتصال کوتاه در سیستم قدرت باردار

برای محاسبه جریان‌های اتصال کوتاه در سیستم قدرت باردار معمولاً از یکی دو روش زیر استفاده می‌شود:

روش اول: استفاده از ولتاژهای بی‌باری گذرا و یا زیرگذرا. در این روش ابتدا با توجه به

معلومات مسأله، ولتاژها و جریان‌های ژنراتورها و موتورهای سنکرون در شرایط بارداری را بدست می‌آوریم (در سیستم‌های بزرگ برای انجام این محاسبات از پخش بار استفاده می‌کنیم). سپس با استفاده از روابط (۷-۷) تا (۷-۱۰) برای ژنراتورها ولتاژهای داخلی گذرا E'_g و یا زیرگذرا E''_g (و برای موتورها E'_m و یا E''_m) را محاسبه می‌کنیم. آنگاه با اتصال نقطه مورد نظر به نقطه صفر سیستم، اتصال کوتاه متقارن را مدلسازی کرده و جریان‌های مورد لزوم را بدست می‌آوریم.

روش دوم: استفاده از مدار معادل تونن واصل جمع اثرها. در این روش ابتدا با داشتن کمیت‌های معلوم سیستم، ولتاژ محل وقوع اتصال کوتاه V_1 و جریان عناصر سیستم را در حالت بارداری بدست می‌آوریم (این محاسبه در سیستم‌های قدرت بزرگ با انجام پخش بار امکان‌پذیر است). سپس با استفاده از مدار معادل تونن سیستم قدرت از دیدگاه محل وقوع اتصال کوتاه، جریان اتصال کوتاه را محاسبه می‌کنیم. برای محاسبه جریان عناصر سیستم (نظیر ژنراتورها، ترانسفورماتورها و خطوط انتقال) بترتیب زیر عمل می‌کنیم:

(الف) منابع ولتاژ موجود در سیستم (ولتاژهای داخلی ماشین‌های سنکرون) را مساوی صفر قرار می‌دهیم و اثر اتصال کوتاه را بصورت یک منبع جریان در محل وقوع اتصال کوتاه در نظر می‌گیریم و بوسیله آن جریان عناصر سیستم را محاسبه می‌کنیم.

(ب) جریان اتصال کوتاه را برابر صفر قرار می‌دهیم و با تأثیر منابع ولتاژ سیستم (ولتاژ داخلی ماشین‌ها) جریان عناصر را محاسبه می‌کنیم. این محاسبه همان مطالعه حالت بارداری سیستم (پخش بار) می‌باشد.

با رعایت جهت جریان‌های بار، جریان‌های بدست آمده از بندهای (الف) و (ب) را با هم جمع می‌کنیم تا جریان‌های اتصال کوتاه در عناصر سیستم بدست آیند. اگر از جریان‌های بار صرف‌نظر کنیم، محاسبه جریان‌های بدست آمده در بند (الف) کفایت می‌کند.

مثال ۷-۲: یک ژنراتور سنکرون ۳۰ MVA ، ۱۳/۲ KV ، و $X''_d = ۰.۲۰$ از طریق یک خط انتقال دارای راکتانس ۱۰٪ در مبنای ۳۰ MVA و ۱۳/۲ KV به یک موتور سنکرون با همان مقادیر نامی ژنراتور متصل است. بر اثر اتصال کوتاه متقارن در ترمینالهای موتور، جریان اتصال کوتاه در محل وقوع و جریان‌های اتصال کوتاه عبوری از ژنراتور و موتور سنکرون را محاسبه کنید. قبل از اتصال کوتاه، موتور سنکرون قدرت ۲۰ MW در ولتاژ ۱۲/۸ KV و ضریب قدرت ۰/۸ پیش‌فاز جذب می‌نمود.

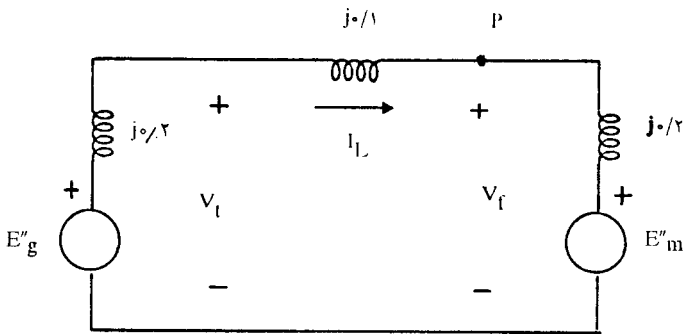
حل: شکل (۷-۱۱) مدار معادل سیستم را نشان می‌دهد. ولتاژ ترمینالهای موتور (نقطه P) را

بعنوان بردار مرجع انتخاب می‌کنیم. قدرت مینا را ۳۰ MVA و ولتاژ مینا را ۱۳/۲ KV در نظر می‌گیریم. بنابراین:

$$V_f = \frac{12/8}{13/2} = 0.97 \angle 0^\circ \text{ PU}$$

جریان مینا برحسب آمپر برابر است با:

$$I_b = \frac{30 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13/2} = 1312 \text{ A}$$



شکل ۷-۱۱: مدار معادل سیستم قدرت مثال ۷-۲

جریان بار قبل از اتصال کوتاه را محاسبه می‌کنیم:

$$|I_L| = \frac{20000}{\sqrt{3 \times 12/8 \times 0.8}} = 1128 \text{ A}$$

$$= \frac{1128}{1312} = 0.86 \text{ PU}$$

بنابراین:

$$I_L = 1128 \angle 36/9^\circ \text{ A} = 0.86 \angle 36/9^\circ \text{ PU} = 0.69 + j0.52 \text{ PU}$$

حال با استفاده از روش اول E''_m و E''_g را بدست می‌آوریم:

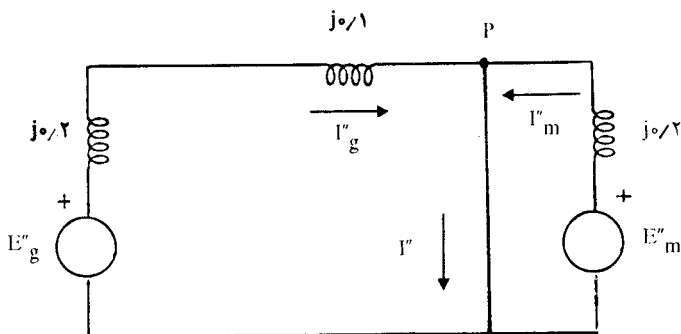
$$V_t = 0.97 + (0.69 + j0.52)j0.1 = 0.918 + j0.069 \text{ PU}$$

$$E''_g = 0.918 + j0.069 + j0.2(0.69 + j0.52) = 0.814 + j0.207 \text{ PU}$$

$$E''_m = 0.97 - j0.2(0.69 + j0.52) = 0.97 - j0.138 + 0.104 \text{ PU}$$

$$E''_m = 1.074 - j0.138 \text{ PU}$$

در شکل (۷-۱۲) اتصال کوتاه در نقطه P، با اتصال این نقطه به نقطه صفر سیستم مدل‌سازی شده‌است.



شکل ۷-۱۲: مدار معادل سیستم قدرت در خلال اتصال کوتاه

جریان ژنراتور و موتور بر اثر اتصال کوتاه بترتیب زیر بدست می‌آیند:

$$I''_g = \frac{0.814 + j0.2 \cdot 0.7}{j0.3} = 0.69 - j2.71 \text{ PU}$$

$$= 1312(0.69 - j2.71) = 905 - j3550 \text{ A}$$

$$I''_m = \frac{1.074 - j0.138}{j0.2} = -0.69 - j5.37 \text{ PU}$$

$$= 1312(-0.69 - j5.37) = -905 - j7050 \text{ A}$$

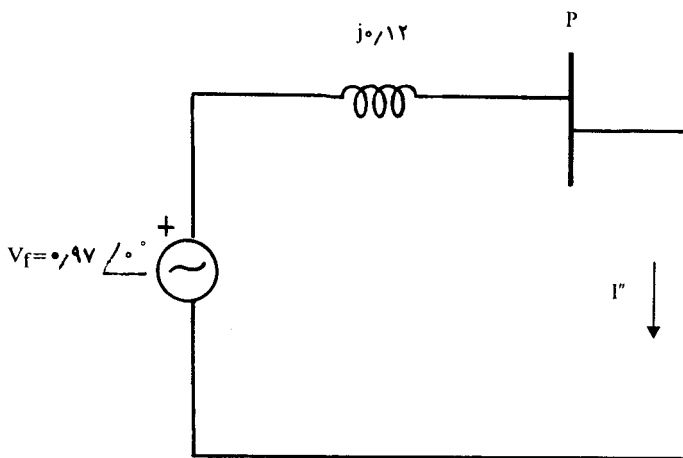
و جریان محل اتصال کوتاه برابر است با:

$$I'' = I''_g + I''_m = 0.69 - j2.71 - 0.69 - j5.37 = -j8.08 \text{ PU}$$

$$= -j8.08 \times 1312 = -j10600 \text{ A}$$

همین نتایج را می‌توان با استفاده از روش دوم بدست آورد. در این روش ابتدا مدار معادل تونن سیستم قدرت از دیدگاه نقطه P را رسم می‌کنیم. سپس با اتصال کوتاه این مدار مطابق شکل (۷-۱۳) جریان اتصال کوتاه I'' را محاسبه می‌کنیم:

$$I'' = \frac{0.97}{j \frac{0.3 \times 0.2}{0.3 + 0.2}} = \frac{0.97}{j0.12} = -j8.08 \text{ PU}$$



شکل ۱۳-۷: بررسی اتصال کوتاه متقارن با استفاده از مدار معادل تونن سیستم

با تقسیم جریان I'' بین ژنراتور و موتور، I''_g و I''_m بدست می آیند:

$$\vec{I}_g = -j\frac{0.8}{0.12 + j0.3} \times \frac{j0.12}{j0.12 + j0.3} = -j\frac{3}{23} \text{ PU}$$

$$\vec{I}_m = -j\frac{0.8}{0.12 + j0.3} \times \frac{j0.3}{j0.12 + j0.3} = -j\frac{4}{85} \text{ PU}$$

مقادیر بدست آمده برای I''_g و I''_m در صورتی قابل قبول هستند که از جریان‌های بار صرفنظر کنیم و سیستم را قبل از اتصال کوتاه بدون بار فرض نمائیم. اگر از جریان‌های بار صرفنظر نکنیم، مقادیر فوق‌الذکر بترتیب زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{I}_g = -j\frac{3}{23} + I_L = -j\frac{3}{23} + 0.69 + j0.52 = 0.69 - j\frac{2}{71} \text{ PU}$$

$$\vec{I}_m = -j\frac{4}{85} - I_L = -j\frac{4}{85} - 0.69 - j0.52 = -0.69 - j\frac{5}{37} \text{ PU}$$

در اینجا باید دقت نمود که I_L و I''_g هم جهت هستند، لذا با هم جمع شده‌اند، لیکن I_L در خلاف جهت I''_m است که از آن کسر می‌گردد. مقادیر بدست آمده I''_g و I''_m برحسب PU با همین مقادیر بدست آمده از روش اول مساوی هستند. بنابراین مقادیر آنها برحسب آمپر نیز با یکدیگر برابر خواهد بود.

۶-۷ کاربرد Z_{bus} در محاسبات اتصال کوتاه متقارن

روش ارائه شده در بخش (۵-۷) برای شبکه‌های کوچک و ساده قابل استفاده است. در سیستم‌های قدرت بزرگ باید روش‌هایی مورد استفاده قرار گیرند که محاسبات اتصال کوتاه توسط کامپیوتر را براحتی انجام‌پذیر نمایند.

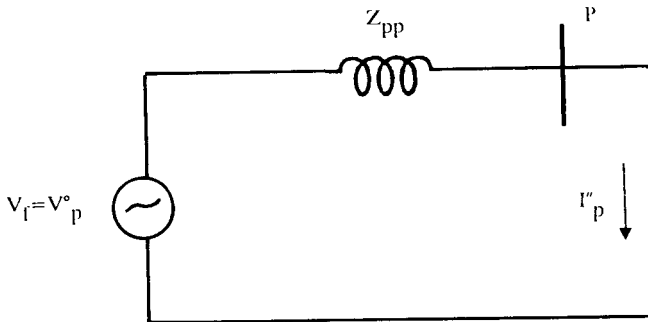
برای انجام محاسبات اتصال کوتاه ابتدا باید جریان‌ها و ولتاژهای سیستم را قبل از وقوع اتصال کوتاه با محاسبه پخش بار بدست آورد. بردار ولتاژ شین قبل از وقوع اتصال کوتاه عبارتست از:

$$V^{\circ} = \begin{bmatrix} V_1^{\circ} \\ V_2^{\circ} \\ \vdots \\ V_n^{\circ} \end{bmatrix} \quad (۷-۱۱)$$

اگر اتصال کوتاه سه‌فاز متقارن در شین P اتفاق بیفتد، با استفاده از مدار معادل تونن سیستم از دیدگاه شین P، مطابق شکل (۱۴-۷)، می‌توان جریان اتصال کوتاه را محاسبه نمود. این جریان برابر است با:

$$I''_P = \frac{V_P^{\circ}}{Z_{PP}} = \frac{V_f}{Z_{PP}} \quad (۷-۱۲)$$

که در آن Z_{PP} از ماتریس Z_{bus} تعیین می‌شود. در اینجا باید دقت نمود که در تشکیل ماتریس‌های Y_{bus} و Z_{bus} راکتانس‌گذرا و یا زیرگذرای ماشین‌های سنکرون را باید تأثیر داد.



شکل ۱۴-۷: اتصال کوتاه متقارن در شین P

ولتاژ شین P در حین اتصال کوتاه صفر می‌باشد، و ولتاژ شین‌های دیگر با توجه به معادله (۲۰-۳)، فصل سوم، و در نظر گرفتن جهت جریان‌ها عبارتند از:

$$V_{sci} = V_i^{\circ} - Z_{ip} I'' \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7-13)$$

این رابطه بصورت ماتریس این‌چنین نوشته می‌شود:

$$V_{sc} = V^{\circ} + Z_{bus} I'' \quad (7-14)$$

که در آن V_{sc} بردار ولتاژ شین در حین اتصال کوتاه، و I'' بردار جریان اتصال کوتاه مطابق زیر تعریف می‌شوند:

$$V_{sc} = \begin{bmatrix} V_{sc1} \\ V_{sc2} \\ \vdots \\ V_{scn} \end{bmatrix} \quad I'' = \begin{bmatrix} \circ \\ \circ \\ \circ \\ \circ \\ -I_p^{\circ} \\ \circ \\ \circ \\ \circ \\ \circ \\ \circ \end{bmatrix} \quad (7-15)$$

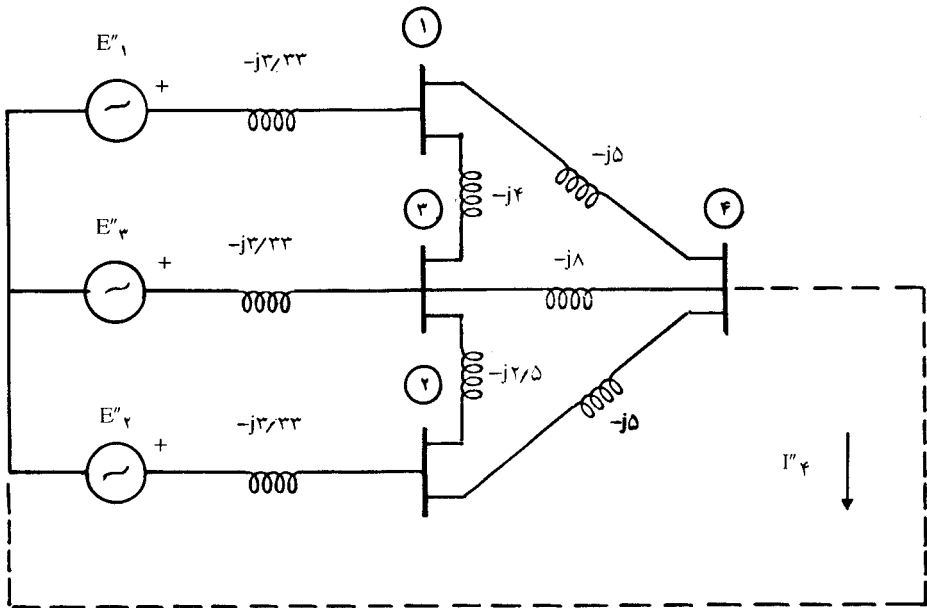
در محاسبات کلاسیک، قبل از اتصال کوتاه معمولاً سیستم قدرت را بدون بار فرض می‌نمایند و لذا ولتاژ در همه نقاط سیستم یکسان و برابر V_f در نظر گرفته می‌شود. یکی از کمیت‌های مهم در محاسبات اتصال کوتاه، قدرت اتصال کوتاه شین برحسب MVA می‌باشد. قدرت اتصال کوتاه شین P از رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$S_{scp} = \sqrt{3} V_p I''_p \times 10^{-3} \quad [MVA] \quad (7-16)$$

در این معادله V_f ولتاژ نامی شین شماره P برحسب KV بوده و I''_p جریان زیرگذرای اتصال کوتاه متقارن در شین P برحسب آمپر می‌باشد.

مثال ۷-۳: سیستم قدرت شکل (۱-۳) از فصل سوم را در نظر بگیرید. در شکل مذکور راکتانس سنکرون ژنراتورها را با راکتانس زیرگذرا $X''_d = 0.2 \text{ PU}$ جایگزین کنید. دیاگرام امپدانس این سیستم در شکل (۷-۱۵) رسم شده است و در آن مقادیر ادمیتانس ها برحسب PU مشخص شده اند.

اتصال کوتاه متقارنی در شین ۴ بوقوع می پیوندد (قسمت خط چین در شکل ۷-۱۵). جریان اتصال کوتاه در محل وقوع I''_4 ، ولتاژ شین ها در حین اتصال کوتاه، جریان ژنراتور ۱ و جریان خط انتقال بین شین های ۱ و ۳ را بدست آورید.



شکل ۷-۱۵: دیاگرام امپدانس سیستم قدرت مثال (۷-۳)

حل: امپدانس بین ولتاژ داخلی هریک از ژنراتورها و شین مربوطه عبارتست از:

$$Z = j(0.2 + 0.1) = j0.3 \text{ PU}$$

و ادمیتانس مربوطه برابر است با:

$$Y = \frac{1}{j0.3} = -j3/33 \text{ PU}$$

این مقادیر در شکل (۷-۱۰) نشان داده شده‌اند. ولتاژ سیستم را قبل از اتصال کوتاه $V_f = 1 \angle 0^\circ \text{ PU}$ در نظر می‌گیریم. ابتدا ماتریس Y_{bus} را بدست می‌آوریم:

$$Y_{bus} = j \begin{bmatrix} -12/33 & 0 & 4 & 5 \\ 0 & -10/83 & 2/5 & 5 \\ 4 & 2/5 & -17/83 & 8 \\ 5 & 5 & 8 & -18 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

ماتریس Z_{bus} را متعاقباً از معکوس Y_{bus} تعیین می‌کنیم:

$$Z_{bus} = j \begin{bmatrix} 0/1488 & 0/0651 & 0/0864 & 0/0978 \\ 0/0651 & 0/1554 & 0/0799 & 0/0967 \\ 0/0864 & 0/0798 & 0/1341 & 0/1058 \\ 0/0978 & 0/0967 & 0/1058 & 0/1566 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

حال جریان اتصال کوتاه در شین ۴ را محاسبه می‌نمائیم:

$$I_f'' = \frac{V_f}{Z_{44}} = \frac{1}{j0/1566} = -j6/386 \text{ PU}$$

ولتاژ شین‌ها در خلال اتصال کوتاه این چنین محاسبه می‌شوند:

$$V_{sc1} = V_1^0 - Z_{14} I_f'' = 1 - j0/0978(-j6/386) = 0/3755 \text{ PU}$$

$$V_{sc2} = V_2^0 = Z_{24} I_f'' = 1 - j0/0967(-j6/386) = 0/3825 \text{ PU}$$

$$V_{sc3} = V_3^0 - Z_{34} I_f'' = 1 - j0/1058(-j6/386) = 0/3244 \text{ PU}$$

$$V_{sc4} = 0$$

جریان ژنراتور ۱ و جریان خط انتقال بین شین‌ها ۱ و ۳ را به عنوان نمونه محاسبه می‌کنیم:

$$I_{G1}'' = (E_1'' - V_{sc1})(-j3/33) = (1 - 0/3755)(-j3/33) \\ = -2/0817 \text{ PU}$$

$$I_{13}'' = (V_1 - V_3)(-j4) = (0/3755 - 0/3244)(-j4) \\ = -j0/2044 \text{ PU}$$

۷-۷ تأثیر مؤلفه DC در جریان اتصال کوتاه

محاسبه جریان زیرگذرای اتصال کوتاه که تا بحال بررسی کردیم شامل مؤلفه DC نبوده است. اگر مؤلفه DC در نظر گرفته شود مقدار مؤثر جریان بلافاصله پس از وقوع اتصال کوتاه بدست می‌آید که بیشتر از جریان زیرگذرا می‌باشد.

مقدار مؤثر جریانی که باید در نیم سیکل اول توسط کلید تحمل می‌شود به جریان آنی^(۱) (موقت) اتصال کوتاه موسوم است و معمولاً از ضرب کردن جریان زیرگذرا در ضریب $1/6$ بدست می‌آید.

جریان قطع^(۲) نامی یک کلید، جریانی است که کلید قدرت^(۳) باید قابلیت قطع آنرا داشته باشد. این جریان کمتر از جریان موقت اتصال کوتاه بوده و به سرعت قطع کلید بستگی دارد. سرعت قطع کلیدها معمولاً بصورت تعداد سیکل، مانند ۸ و ۵ و ۳ و ۲ سیکل، اندازه‌گیری می‌شود و مقصود از آن تعداد سیکل پس از وقوع اتصال کوتاه تا خاموش شدن کامل قوس در کلید می‌باشد. جدول (۷-۲) ضریب مربوط به تأثیر مؤلفه DC را برای سرعت‌های مختلف کلیدها نشان می‌دهد.

جدول ۷-۲: ضریب تأثیر مؤلفه DC در جریان اتصال کوتاه

ضریب مؤلفه DC	سرعت قطع کلید برحسب تعداد سیکل
۱	۸
۱/۱	۵
۱/۲	۳
۱/۴	۲

پس از تعیین جریان قطع نامی، می‌توان مقدار نامی قدرت قطع کلید را مطابق زیر بدست آورد:

$$(7-17) \quad (\text{جریان قطع نامی}) (\text{ولتاژ نامی شین}) \sqrt{3} = (\text{قدرت قطع})$$

در این رابطه ولتاژ نامی شین برحسب KV، و جریان قطع برحسب KA جایگزین می‌گردند تا قدرت قطع برحسب MVA بدست آید. تجربه نشان می‌دهد در مواردی که قدرت اتصال کوتاه از S_{sc} (۷-۱۶) در شینی بیش از ۵۰۰ مگاوات آمپر باشد به ضرائب تأثیر مؤلفه DC در جدول (۷-۲) باید $1/1$ ، $1/2$ ، $1/3$ و $1/5$ تبدیل گردند.

۷-۸ استفاده از کامپیوتر در محاسبات اتصال کوتاه متقارن

محاسبه اتصال کوتاه متقارن با استفاده از روش ارائه شده در بخش (۷-۶) براحتی می‌تواند توسط کامپیوتر انجام شود. شکل (۷-۱۶) فلوچارت محاسبات اتصال کوتاه متقارن را نشان می‌دهد. در این فلوچارت داریم:

$$n = \text{تعداد شین‌ها}$$

$$I^2_p = \text{جریان اتصال کوتاه شین } P \text{ برحسب PU}$$

$$P = \text{شماره شین}$$

$$I_{bp} = \text{جریان مبنا در شین } P$$

$$I_{scp} = \text{جریان اتصال کوتاه شین } P \text{ برحسب آمپر}$$

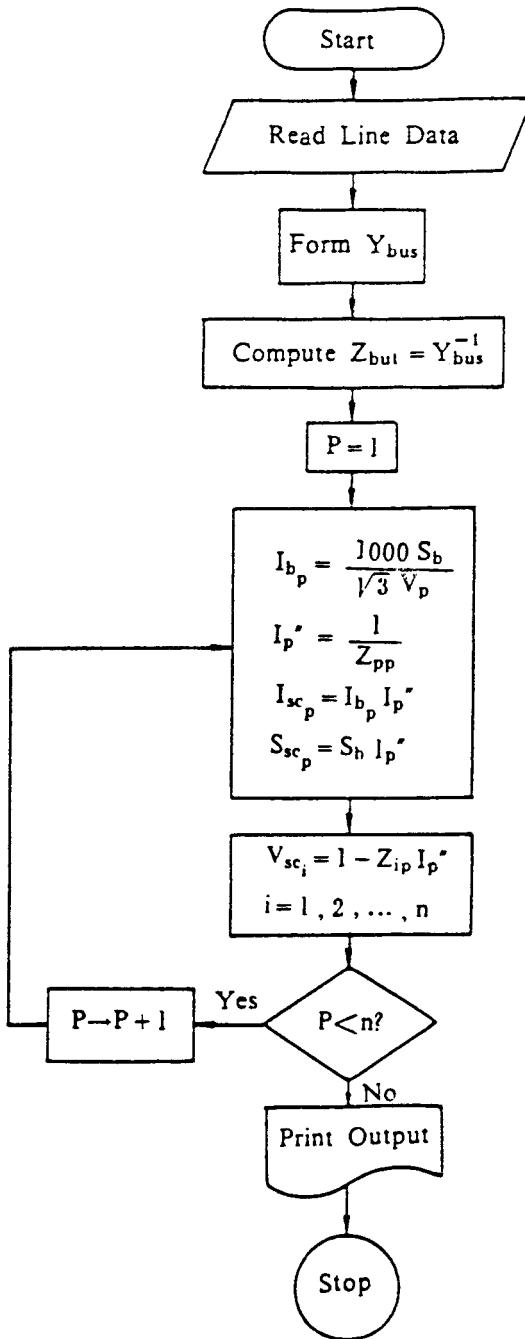
$$S_b = \text{قدرت مبنا برحسب MVA}$$

$$S_{scp} = \text{قدرت اتصال کوتاه شین } P \text{ برحسب MVA}$$

$$V_{sci} = \text{ولتاژ شین } i \text{ در خلال اتصال کوتاه}$$

$$V_p = \text{ولتاژ شین } P \text{ برحسب KV}$$

در شکل (۷-۱۶) علاوه بر محاسبه جریان و قدرت اتصال کوتاه شین‌ها، نحوه محاسبه



شکل ۱۶-۷: فلوچارت محاسبات اتصال کوتاه متقارن

مسائل فصل هفتم

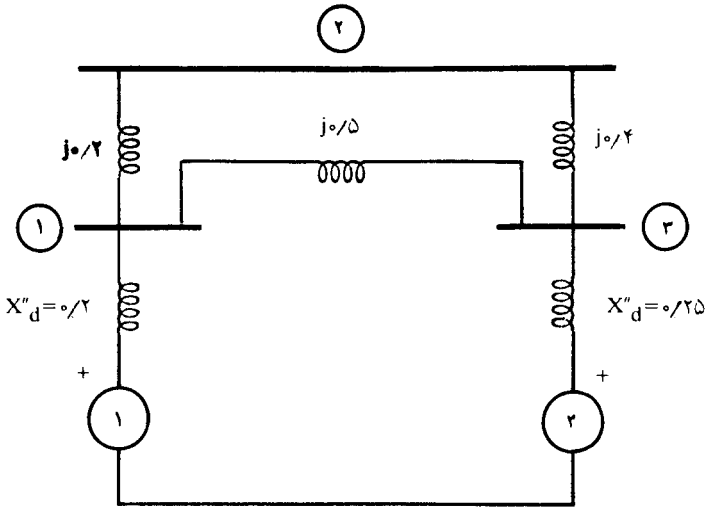
۷-۱ یک ژنراتور 250MVA ، 20KV با راکتانس $X_d = 0.2 \text{ PU}$ به ترانسفورماتور 250MVA ، 20KV / 230KV با راکتانس $X = 0.1 \text{ PU}$ متصل است. اگر اتصال کوتاه سه‌فازی در طرف فشار قوی ترانسفورماتور اتفاق بیفتد، جریان زیرگذرای اتصال کوتاه را برحسب PU و آمپر و همچنین ولتاژ ترمینالهای ژنراتور را برحسب کیلوولت بدست آورید. سیستم قدرت قبل از اتصال کوتاه بدون بار و ولتاژ طرف فشار قوی $223/1$ کیلوولت بوده است.

۷-۲ یک ژنراتور سنکرون از طریق یک ترانسفورماتور به موتور سنکرونی متصل است. راکتانس زیرگذرای ژنراتور و موتور در مبنای یکسان بترتیب 0.2PU و 0.3PU بوده و راکتانس پراکندگی ترانسفورماتور در همان مبنا 0.1PU می‌باشد. هنگامی که ولتاژ ترمینالهای ژنراتور 1.022° و جریان آن 1PU با ضریب قدرت 0.85 پس‌فاز است، اتصال کوتاه متقارنی در ترمینالهای موتور اتفاق می‌افتد. جریان‌های زیرگذرای اتصال کوتاه در محل وقوع، ژنراتور و موتور را از دو روش زیر بدست آورید:

الف) با محاسبه ولتاژ داخلی زیرگذرای ژنراتور و موتور
ب) با استفاده از قضیه تونن واصل جمع اثرها

۷-۳ در شکل (۷-۱۷) جریان زیرگذرای اتصال کوتاه که از ژنراتور ۱ و خط انتقال ۲-۱ جاری است و همچنین ولتاژ شین‌ها را بر اثر اتصال کوتاه سه‌فاز متقارن در شین ۲ محاسبه کنید. سیستم قدرت قبل از اتصال کوتاه بدون بار و ولتاژ شین 1PU فرض شود.

۷-۴ دو موتور سنکرون بترتیب دارای راکتانس‌های زیرگذرای 0.8 و 0.25 پریونیت در مبنای 480V و 2MVA به یک شین متصل هستند. این موتورها از طریق خط انتقالی با راکتانس 0.23Ω به یک سیستم قدرت متصل می‌باشند. قدرت اتصال کوتاه سیستم قدرت $9/6\text{MVA}$ و ولتاژ نامی آن 480V می‌باشد. سیستم را قبل از اتصال کوتاه بدون بار فرض کنید و بر اثر اتصال کوتاه سه‌فاز متقارن در شین موتورها، جریان اتصال کوتاه در محل وقوع را محاسبه کنید. ولتاژ ترمینالهای موتورها قبل از اتصال کوتاه 440V بوده است.



شکل ۱۷-۷: مربوط به مسأله (۷-۳)

۷-۵ ماتریس امپدانس شین برای یک سیستم قدرت ۴ شینه برحسب PU مطابق زیر است:

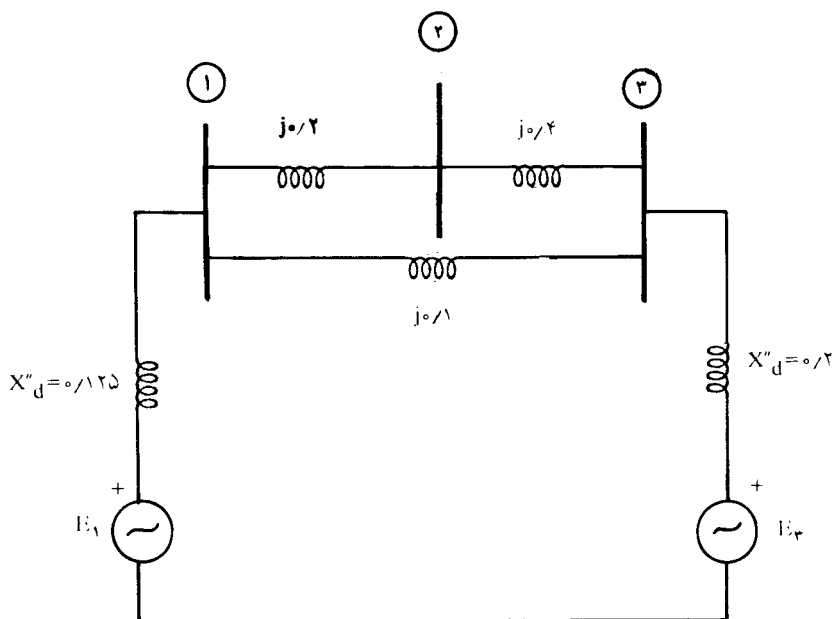
$$Z_{bus} = j \begin{bmatrix} 0.15 & 0.08 & 0.04 & 0.07 \\ 0.08 & 0.15 & 0.06 & 0.09 \\ 0.04 & 0.06 & 0.13 & 0.05 \\ 0.07 & 0.09 & 0.05 & 0.12 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

ژنراتورهای سیستم به شین‌های ۱ و ۲ متصل بوده، و راکتانس زیرگذرای آنها در ماتریس Z_{bus} منظور شده است. جریان اتصال کوتاه متقارن در شین ۴ را بدست آورید. همچنین بر اثر اتصال کوتاه مذکور، جریان ژنراتور ۲ با راکتانس زیرگذرای ۰/۲PU را محاسبه کنید.

۷-۶ در شکل (۷-۱۸) امپدانس‌ها در مبنای ۱۰۰MVA برحسب PU مشخص شده‌اند. این سیستم قبل از اتصال کوتاه بدون بار و ولتاژ شین ۱ معادل ۱PU بوده است. الف) ماتریس Z_{bus} را برای این سیستم تشکیل دهید.

ب) جریان اتصال کوتاه متقارن و قدرت اتصال کوتاه (MVA) در شین ۱ را محاسبه کنید.

ج) ولتاژ شین‌های ۲ و ۳ و جریان عبوری از خط ۲-۳ را بر اثر اتصال کوتاه در شین ۱ بدست آورید.



شکل ۷-۱۸: مربوط به مسأله (۷-۶)

۷-۷ می‌خواهیم قدرت اتصال کوتاه شین ۱، در مسأله (۷-۶) را به $\frac{2}{3}$ مقدار بدست آمده برسانیم. برای اینکار راکتوری با ژنراتور متصله به شین ۱ سری می‌کنیم. راکتانس این راکتور را بدست آورید.